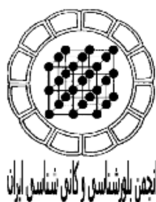
مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران

مقاله پژوهشی

سال بیست و نهم، شمارهٔ اول، بهار ۱۴۰۰، از صفحهٔ ۱۹ تا ۳۴



بررسی کانی‌سازی مس±طلا نوع رگه‌ای رخداد معدنی سنگان (جنوب شرق تربت حیدریه)، براساس ویژگی‌های کانی‌شناسی، زمین‌شیمی و سیال‌های درگیر

حجت غلامی[1]، آزاده ملکزاده شفارودی[*1و2]، محمدحسن کریم‌پور[1و2]

۱- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲- گروه پژوهشی اکتشاف ذخایر معدنی شرق ایران، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

(دریافت مقاله: ۹۸/۱۱/۱، نسخه نهایی: ۹۹/۳/۷)

چکیده: گستره اکتشافی سنگان واقع در جنوب شرق تربت‌حیدریه در استان خراسان رضوی، از نظر زمین‌شناسی ناحیه‌ای در نیمه شرقی کمربند ماگمایی خواف-کاشمر-بردسکن قرار دارد. قدیمی‌ترین واحد منطقه رسوب‌های دگرگونی سازند شمشک (اسلیت، شیست، کوارتزیت) هستند که مورد نفوذ توده گرانیتی کافردوغ قرار گرفته‌اند. دایک‌هایی با ترکیب کوارتز مونزوسینیت و دیوریت در آخرین مرحله فعالیت ماگمایی در این واحدها نفوذ کرده‌اند. کانه‌زایی با کنترل ساختاری در راستای گسل‌های فرعی منشعب شده از گسل بزرگ درونه با روندهای کلی شمال شمالی غربی-جنوب جنوب شرقی تا غرب شمال غربی-شرق جنوب شرقی (شیب ۶۰ تا ۹۰ درجه به سمت جنوب و غرب) و شمال شرقی-جنوب غربی (شیب ۵۰ تا ۷۰ درجه به سمت شرق) شکل گرفته است. بیشتر ذخیره معدنی در پهنه‌های گسلی واحد دگرگونی شمشک در نتیجه ته‌نشست از سیال گرمابی کانه‌دار در فضای خالی گسل‌ها به عنوان سیمان قطعات برش گسلی تشکیل شده است. کانه‌زایی درونزاد در قالب کالکوپیریت به عنوان کانه اصلی و به مقدار کمتر پیریت همراه با کانی‌های باطله کوارتز و باریت دیده می‌شود. کانی‌های ثانویه مالاکیت، کریزوکلا، کالکوسیت، نئوتوسیت و اکسیدهای ثانویه آهن کانی‌سازی پهنه اکسیدی و برونزاد رگه‌ها را تشکیل می‌دهند. ساخت و بافت‌های رگه‌ای-برشی، پرکننده فضای خالی، رگچه‌ای و جانشینی ثانویه از ویژگی‌های رگه‌های کانی‌سازی این منطقه هستند. سیلیسی شدن دگرسانی اصلی در ارتباط با کانه‌زایی است. نتایج زمین شیمی رگه‌ها، افزون بر مقدار بالای عنصر مس (تا بیش از ۵ درصد)، ناهنجاری قابل توجه طلا تا ۰٫۴ گرم در تن را نشان می‌دهد، در حالیکه سایر عناصر فلزی مهم ناهنجاری ندارند. با این وجود، عناصر مس، سرب، روی، نقره و مولیبدن همبستگی زمین شیمیایی مثبت خوبی دارند، اما طلا با بیشتر عناصر (به جز نقره) همبستگی نشان نمی‌دهد. بررسی سیال‌های درگیر اولیه دوفازی غنی از مایع کانی کوارتز و باریت به همراه نتایج کانه‌نگاری دو فاز کانه‌زایی درونزاد را نشان می‌دهد. بر این اساس، کانی‌سازی اولیه در فاز اصلی از سیال گرمابی درونزاد با دمای ۲۷۴ تا ۳۱۸ درجه سانتیگراد و شوری ۷٫۳ تا ۱۲ درصد وزنی معادل نمک طعام شکل گرفته است. فاز تاخیری مربوط به کانه‌زایی باریت از سیالی با دمای ۲۰۰ تا ۲۵۹ درجه سانتیگراد و شوری ۱۰٫۲ تا ۱۱٫۴ درصد وزنی معادل نمک طعام تشکیل شده است. داده‌های دما و شوری نقش فرایندهای آمیختگی سیال‌ها و رقیق‌شدگی توسط سیال‌های جوی سرد و رقیق را در تشکیل ذخیره معدنی نشان می‌دهد. براساس ویژگی‌های کانی‌شناسی، ساخت، بافت، دگرسانی، زمین شیمی رگه‌ها و نتایج بررسی سیال‌های درگیر، رخداد معدنی سنگان بیشترین شباهت را با کانسارهای رگه‌ای-گرمابی نوع مس±طلا فراگرمایی نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: *کانی‌شناسی، زمین‌شیمی، سیال‌های درگیر، رخداد معدنی سنگان، مس±طلا فراگرمایی، کمربند خواف-کاشمر-بردسکن*

مقدمه

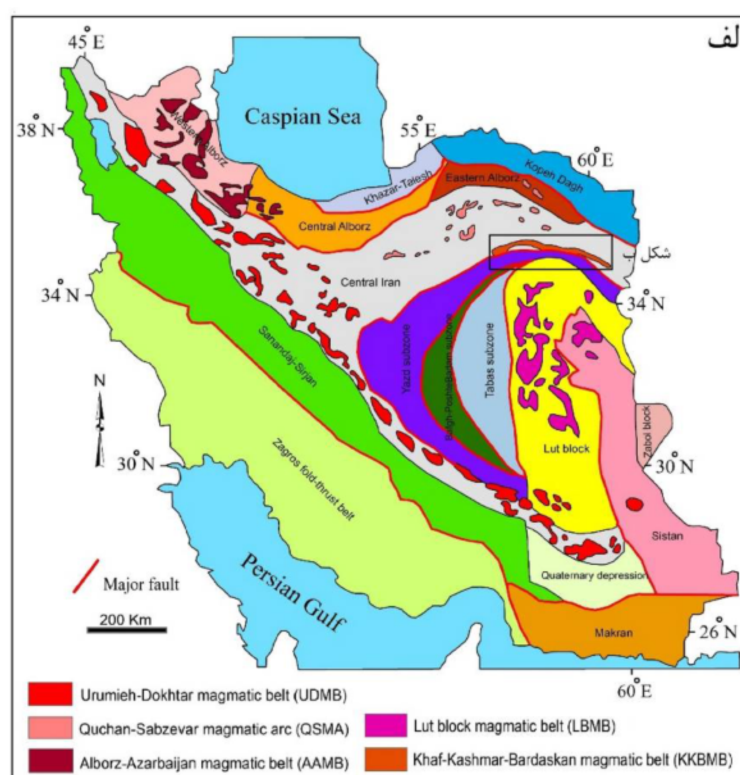
گستره اکتشافی سنگان (معروف به سنگان بالا خواف) در ۲۵ کیلومتری جنوب شرق تربت حیدریه در استان خراسان رضوی، بین طول‌های جغرافیایی "۱۶ '۲۸ °۵۹ تا "۷ '۲۹ °۵۹ شرقی و عرض‌های جغرافیایی "۱۶ '۱۰ °۳۵ تا "۵۱ '۱۰ °۳۵ شمالی واقع شده است. منطقه مورد نظر در نیمه شرقی کمربند

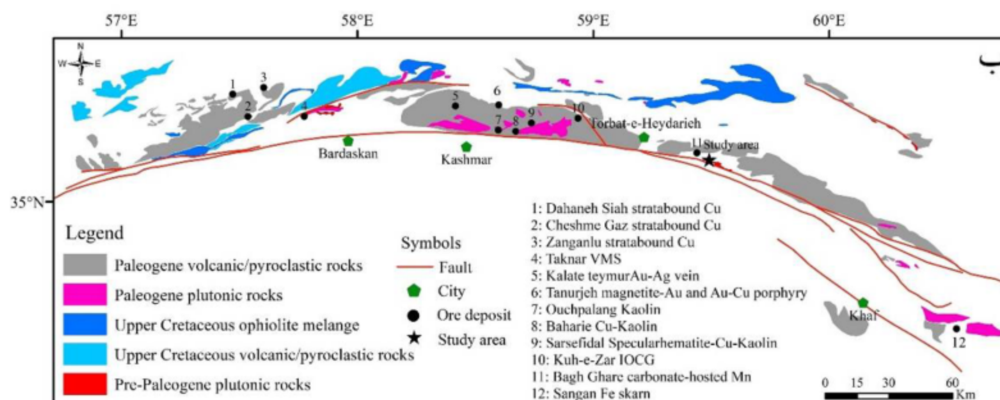
*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۵۱۳۸۸۰۵۴۸۸، پست الکترونیکی: shafaroudi@um.ac.ir

[DOR: 20.1001.1.17263689.1400.29.1.2.9]

[DOI: 10.52547/ijcm.29.1.19]

ماگمایی خواف-کاشمر-بردسکن در شمال قطعه قرار داشته که با روند کلی شرقی-غربی به صورت کمانی در شمال گسل بزرگ درونه قرار دارد (شکل ۱) و طولی حدود ۴۰۰ کیلومتر و عرض ۵۰ کیلومتر می‌توان برای آن در نظر گرفت [۱]. به طور کلی، عمده واحدهای سازنده این کمربند ماگمایی، سنگ‌های آتشفشانی-آذرآواری و درونی با ترکیب اسیدی تا حدواسط هستند. کریم‌پور و همکاران [۲] کمربند خواف-کاشمر-بردسکن را پهنه‌ای مهم برای پتانسیل کانی‌سازی اکسیدآهن-مس-طلا (IOCG) معرفی کرده‌اند. ویژگی ماگمایی و زمین-ساخت این ناحیه باعث تبدیل آن به یکی از پهنه‌های مهم فلززایی در ایران شده است. از جمله ذخایر فلزی این پهنه می‌توان به طلای نوع IOCG کوه‌زر [۱-۳]، اسکارن آهن سنگان [۴-۶]، مگنتیت-طلای تنورجه [۷]، طلا-مس پورفیری تنورجه [۸، ۹]، مگنتیت-اسپکیولاریت- مس- طلای شهرک [۱۰]، مس-طلا کلاته تیمور [۱۱]، کانی‌سازی نوع IOCG شمال کاشمر [۱۲، ۱۳]، کانی‌سازی احتمالی پورفیری و IOCG نامق [۱۴، ۱۵]، مس رگه‌ای زاوه [۱۶] و از بین ذخایر غیرفلزی می‌توان به کائولن اوچ پلنگ، سرسفیدال و بهاریه اشاره کرد که همه آنها وابسته به فعالیت ماگمایی ترشیری هستند (شکل ۱).





شکل ۱ الف) تقسیم‌بندی پهنه‌های ساختاری-رسوبی ایران (برگرفته از مرجع [۱۷] با تغییرات)، ب) نقشه ساده شده کمربند ماگمایی خواف-کاشمر-بردسکن همراه با کانی‌سازی‌های مهم و جایگاه منطقه مورد بررسی.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1400.29.1.2.9]
[DOI: 10.52547/ijcm.29.1.19]

از آنجا که بخش عمده پژوهش‌های در ارتباط با این کمربند فلززایی بر نیمه غربی آن متمرکز بوده است، نیاز به بررسی پیرامون پتانسیل‌های معدنی در بخش شرقی این کمربند بیش از پیش احساس می‌شود. به این منظور، در این پژوهش برای نخستین بار کانی‌سازی رگه‌ای سنگان در نیمه شرقی این کمربند بررسی و جنبه‌های مختلف زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، زمین‌شیمی، سیال‌های درگیر و سرانجام نوع رخداد کانه‌زایی در این منطقه تعیین گردید.

روش بررسی

به منظور تهیه نقشه‌های زمین‌شناسی، دگرسانی و کانی‌سازی، برداشت داده‌های صحرایی به همراه نمونه‌برداری در گستره حدود ۱٫۵ کیلومتری انجام شد. در مجموع، ۱۱۰ نمونه دستی برداشت گردید که از این بین، ۶۰ مقطع نازک برای بررسی‌های سنگ‌شناسی، دگرسانی و ۱۵ مقطع صیقلی و نازک صیقلی به منظور بررسی‌های کانی‌شناسی، بافت، توالی همبرزایی و همچنین تهیه نقشه توزیع رگه‌های کانی‌سازی در مقیاس ۱:۲۰۰۰ تهیه شد. در پایان، نقشه‌ها با استفاده از نرم افزار Arc GIS رسم شدند. بررسی زمین شیمی رگه‌های کانی‌سازی با برداشت ۱۴ نمونه خرده‌سنگی، آماده‌سازی آنها به روش انحلال در تیزاب سلطانی (Aqua regia) و تجزیه به روش طیف‌سنجی نشری پلاسمای جفت شده القایی (ICP-OES) برای ۳۶ عنصر از جمله مس، سرب، روی و آرسنیک در آزمایشگاه زرآزما انجام شد. براساس نتایج به دست آمده، ۶ نمونه مناسب با روش آماده‌سازی عیارسنجی گرمایی برای طلا در همین آزمایشگاه تجزیه شدند. بررسی سیال‌های درگیر برای ۹ مقطع دوبرصیقل کوارتز و ۱ مقطع باریت از رگه‌های کانه‌دار به منظور ریزدماسنجی، تعیین نوع نمک و مقدار شوری محلول کانه‌دار انجام شد. این آزمایش‌ها توسط دستگاه گرم و سرد کننده مدل THM600 ساخت شرکت لینکام انگلستان با توان دماسنجی در گستره ۱۹۰- تا ۶۰۰+ درجه سانتی‌گراد و دقت $\pm 1\ C^{o}$ در دانشگاه فردوسی مشهد انجام گرفت. شوری و چگالی در سامانه H_2O-NaCl با استفاده از رابطه تعیین شده HOKIEFLINCS-H_2O-NaCl [۱۸، ۱۹] در نرم‌افزار اکسل محاسبه و سپس نمودارها و بافت‌نگارهای لازم در نرم افزارهای SPSS و Corel DRAW رسم گردید.

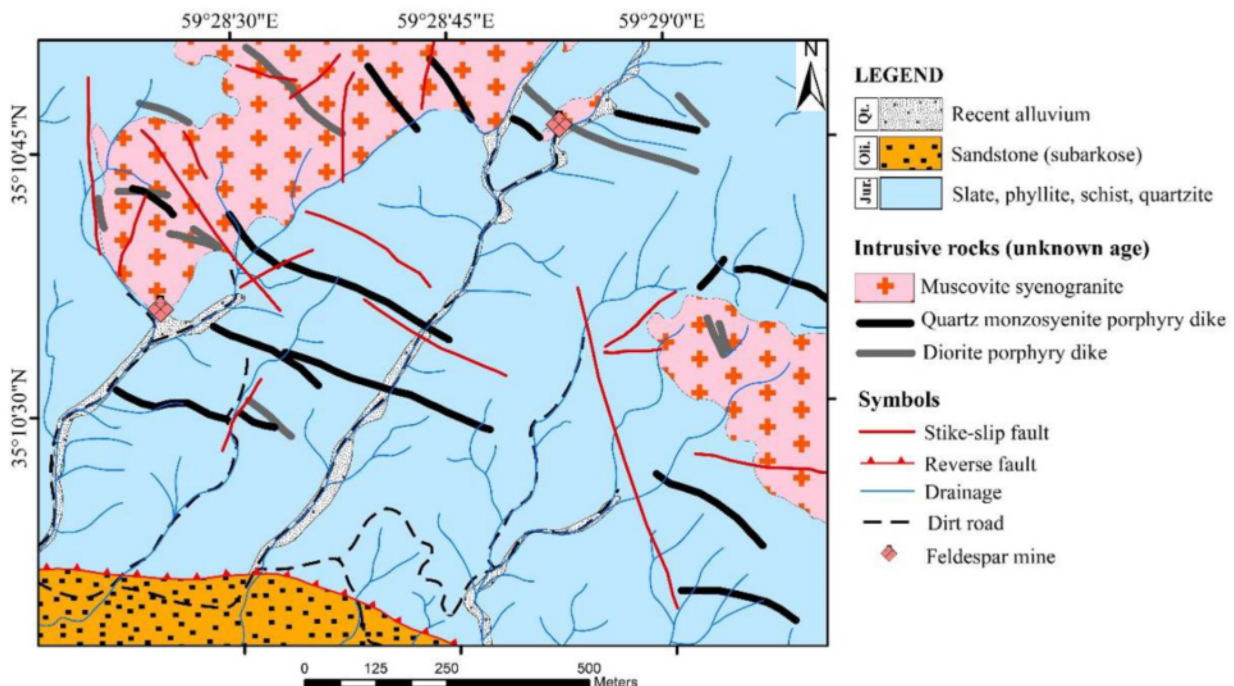
زمین‌شناسی

فعالیت‌های ماگمایی سنوزوئیک در شمال شرق ایران به ویژه در زمان ائوسن-الیگوسن گسترده و حجیم بوده است به باور شفائی‌مقدم و همکاران [۲۰]، فعالیت ماگمایی شمال گسل درونه وابسته به کمربند ماگمایی سبزوار است که در بخش جنوبی این کمربند، در قسمت جنوبی افیولیت‌های کرتاسه پسین سبزوار-تربت حیدریه به‌صورت سنگ‌های نفوذی و آتشفشانی برونزد دارند. رمضانی و تاکر [۲۱] گرانیتوئیدهای منطقه کاشمر که بخش اصلی فعالیت آذرین نفوذی این کمربند محسوب می‌شوند را جزئی از پهنه زمین‌ساختی ۶۰۰ کیلومتری کرمان-کاشمر می‌دانند. این ناحیه در معرض گسل-های فراوانی است که مهمترین آنها گسل درونه و شاخه‌های فرعی آن هستند. سامانه گسل درونه که با ۹۰۰ کیلومتر طول دومین گسل طویل پس از گسل اصلی زاگرس است، سازوکاری راستالغز چپ‌گرد همراه با مولفه شیب‌لغز معکوس [۲۲] داشته و سهم عمده‌ای در شکل‌گیری ساختارهای کانسارساز در کمربند خواف-کاشمر-بردسکن دارد.

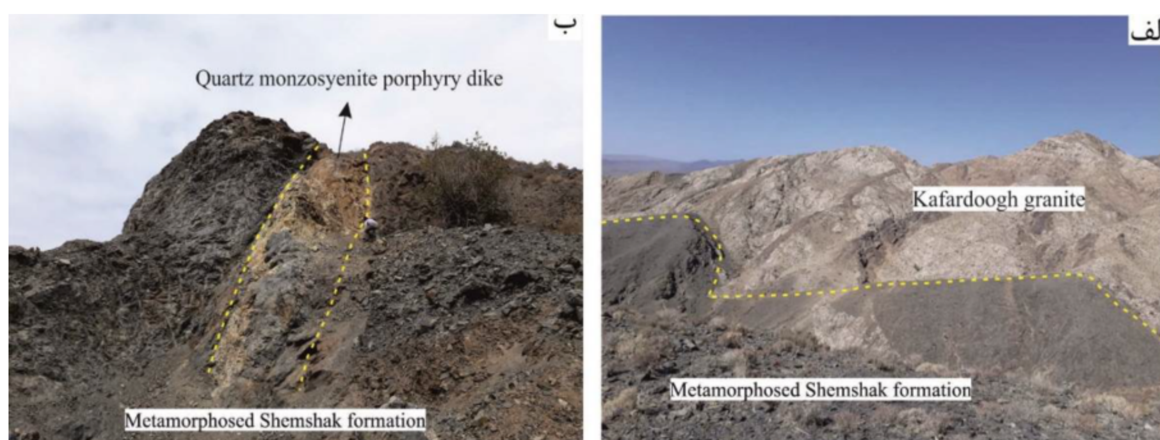
منطقه اکتشافی سنگان در نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ تربت‌حیدریه قرار دارد [۲۳]. رسوب های سازند شمشک به سن ژوراسیک پیشین که بیشترین گسترش را در منطقه مورد بررسی دارد (شکل ۲) با رنگ صحرایی خاکستری تیره (شکل ۳) و مکان نگاری نه چندان مرتفع مشخص شده و به صورت اولیه شامل شیل و ماسه سنگ بوده که دستخوش دو مرحله دگرگونی شده است. این واحد طی مرحله نخست در نتیجه رخداد دگرگونی ناحیه‌ای به صورت ضعیف تا حد رخساره شیست سبز دگرگون شده است و به صورت اسلیت و کوارتزیت دیده می‌شود. در قسمت‌هایی که این سنگ‌ها مورد نفوذ توده گرانیتی قرار گرفته‌اند، با نزدیکی به توده نفوذی، عملکرد دگرگونی مجاورتی باعث بالا رفتن شدت دگرگونی و تشکیل میکا شده است. این واحد میزبان اصلی کانی‌سازی در منطقه است. واحد نفوذی سینوگرانیتی کافردوغ پس از رسوب‌های دگرگون شده سازند شمشک بیشترین گسترش را دارد (شکل ۲) و رخنمون‌های سفید رنگ آن در صحرا به همراه پستی و بلندی خشن (شکل ۳-الف)، به خوبی باعث تمایز آن از دیگر واحدها شده است. توده کافردوغ با طول حدود ۱۳ کیلومتر و عرض متغیر (تا ۲٫۵ کیلومتر)، تنها در واحد رسوب‌های دگرگون‌شده سازند شمشک

[DOR: 20.1001.1.17263689.1400.29.1.2.9]
[DOI: 10.52547/ijcm.29.1.19]

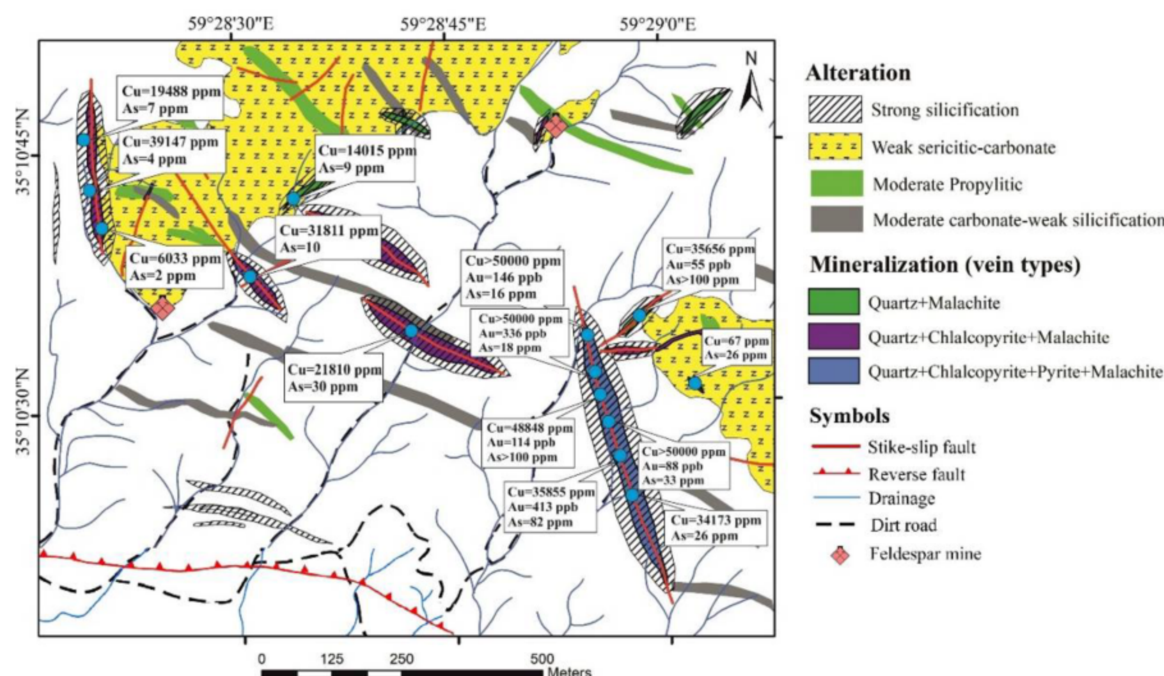
برونزد داشته و فقط بخش کوچکی از غرب آن در گستره اکتشافی سنگان رخنمون دارد. توده مورد نظر دارای بافت نیمه خودریخت دانه‌ای، گرافیکی و گرانوفیری بوده و کانی‌های اصلی تشکیل دهنده آن کوارتز، فلدسپار قلیایی، پلاژیوکلاز و مسکویت است. دو پیشکار جهت استخراج فلدسپات در همین واحد حفر شده است. دگرسانی‌های فراگیر توده، سریسیتی و کربناتی ضعیف هستند (شکل ۴) و دگرسانی سیلیسی نیز در محل رگه‌های سیلیسی و لبه آن که واحد سینوگرانیتی را قطع می‌کند به صورت رگه-رگچه و در متن سنگ دیده می‌شود. وجود بافت میارولیتی از دیگر ویژگی‌های این توده است و با حضور حفره‌های ۱ تا ۱۵ سانتیمتری مشخص می‌شود. این بافت بیشتر با رشد بلورهای درشت خودشکل کوارتز و گاه بلورهای خودشکل تورمالین (نوع شورل) در دیواره حفره‌ها همراه است. جوانترین فاز ماگمایی در منطقه با نفوذ دایک‌های نیمه عمیق مشخص می‌شود که به دو دسته کوارتزمونزوسینیت پورفیری و دیوریت پورفیری تقسیم شده و واحد سینوگرانیتی و دگرگونی‌های شمشک را قطع می‌کنند. این دایک‌ها ارتباط مشخصی با گسل‌های راستا لغز منطقه دارند و روند عمومی شمال غربی-جنوب شرقی تا غرب شمال غربی-شرق جنوب شرقی آنها به خوبی با روند گسل‌های منطقه همخوانی دارد (شکل ۲). عملکرد گسل‌های راستا لغز به عنوان مجرای مناسب برای حرکت و جایگیری ماگما شناخته شده است. دایک‌های کوارتزمونزوسینیت پورفیری با ستبرای ۰/۵ تا ۴ متر، طول تا ۴۰۰ متر و رنگ کرم در صحرا دیده می‌شوند (شکل ۳ ب). بافت پورفیری و گلومروپورفیری با زمینه دانه‌ریز و ۳۰ درصد درشت‌بلور پلاژیوکلاز در این واحد قابل دیده است. پلاژیوکلازها دستخوش دگرسانی کربناتی شده‌اند و دگرسانی سیلیسی نیز در متن سنگ و کمتر به صورت رگچه دیده می‌شود. دایک‌های دیوریت پورفیری نیز با روندی مشابه با رنگ سبز تیره تا مشکی تا ۴۰۰ متر قابل پیگیری هستند و ستبرای آن‌ها بین ۳۰ سانتیمتر تا ۲ متر متغیر است. بافت سنگ پورفیری با ۱۰ درصد درشت‌بلور پلاژیوکلاز است. پلاژیوکلازها دچار دگرسانی پروپلیتی شده و به کلریت، کلسیت و اپیدوت تبدیل شده‌اند. هر دو دسته این دایک‌ها ارتباطی با کانی‌سازی ندارند و تنها در نقاطی که توسط رگه‌ها قطع شده‌اند، دارای کانی‌سازی هستند. واحد ماسه سنگی الیگوسن به رنگ سبز و با لایه‌بندی ستبر تنها در جنوب منطقه رخنمون دارد (شکل۲).



شکل ۲ نقشه زمین‌شناسی منطقه اکتشافی سنگان.



شکل ۳ الف) دورنمایی از توده گرانیتی کافردوغ که به درون سازند شمشک نفوذ کرده است (دید به سمت غرب)، ب) نفوذ دایک مونزوسینیت پورفیری درون سازند شمشک (دید به سمت شمال غرب)



شکل ۴ جایگاه و نتایج تجزیه شیمیایی نمونه‌های خرده‌سنگی بر نقشه دگرسانی-کانی‌سازی.

کانه‌زایی و دگرسانی

در منطقه سنگان، کانه‌زایی مس±طلا ارتباط تنگاتنگی با رخداد برشی شدن در نتیجه عملکرد گسل‌ها دارد. ترانشه‌های اکتشافی نیز در راستای این گسل‌های راستا لغز کانه‌دار حفر شده است. پراکندگی و انواع رگه‌های کوارتز کانه‌دار در شکل ۴ نشان داده شده است. به طور کلی، بیشتر گسل‌های منطقه از دو روند شمالی غربی-جنوب جنوب شرقی (NNW-SSE) تا شمال شرقی-جنوب غربی (WNW-ESE) و NE-SW با شیب ۶۰ تا ۹۰ درجه به سمت جنوب و غرب و شیب ۵۰ تا ۷۰ درجه به سمت شرق پیروی می‌کنند (شکل ۵-الف). کانی‌سازی در قالب ۱۱ رگه به درازای ۲۰ تا ۴۵۰ متر و پهنای ۱۰ سانتیمتر تا ۳ متر دیده می‌شود (شکل ۵-ب). کانی-سازی به شکل رگه‌ای به صورت پرکننده فضای خالی قطعه‌های برشی به همراه رگچه‌ای، پراکنده و جانشینی ثانویه دیده می-گردد. کانی‌سازی در قالب کانی‌های اولیه کالکوپیریت و پیریت و کانی‌های ثانویه مالاکیت، کالکوسیت، کریزوکلا، گوتیت، هماتیت، لیمونیت و به مقدار کمتر نئوتوسیت و دیگر اکسیدهای منگنز دیده می‌شود که کوارتز و بسیار کمتر باریت

[DOR: 20.1001.1.17263689.1400.29.1.2.9]
[DOI: 10.52547/ijcm.29.1.19]

به عنوان باطله آنها را همراهی می‌کنند. فعالیت‌های زمین-ساختی که با گسلش و تشکیل برش‌های گسلی همراه است، نقش اصلی را در تشکیل کانه‌ها داشته است. براساس رده‌بندی برش‌های زمین‌ساختی [۲۴]، انواع برش‌های خردشده، موزائیکی و به هم ریخته در پهنه‌های گسلی قابل شناسایی است ولی با توجه به حضور قابل توجه کوارتز به عنوان سیمان این برش‌ها، بیشتر آنها در رده برش‌های به هم ریخته غنی از سیمان قرار دارند (شکل ۵-پ).

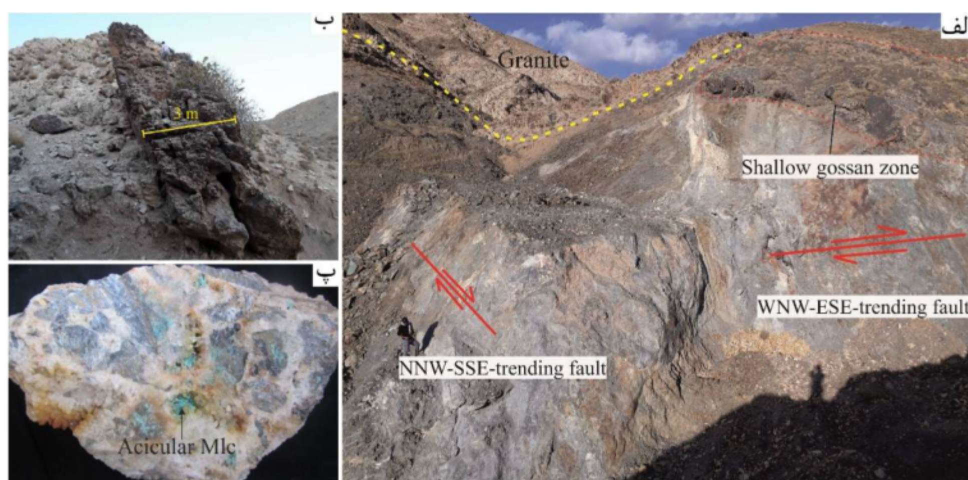
مهمترین دگرسانی در ارتباط با کانی‌سازی، سیلیسی شدن است (شکل ۴) که حجم قابل توجهی کوارتز در رگه‌های کانی-سازی به صورت پرکننده فضای خالی و گاه توده‌ای و در فاصله تا ۵ متر از لبه رگه‌ها به صورت رگه-رگچه‌ای و افشان در متن سنگ میزبان دیده می‌شود. توضیحات مربوط به دگرسانی واحدهای نفوذی در بخش زمین‌شناسی بیان شد.

کانی‌شناسی، ساخت و بافت

کالکوپیریت: کالکوپیریت مهمترین و فراوان‌ترین کانی در رگه-های سیلیسی-سولفیدی در منطقه معدنی سنگان است و ۵ تا ۴۰ درصد حجم رگه‌ها را تشکیل می‌دهد. این کانی بیشتر به صورت پرکننده فضای خالی همراه با کوارتز (شکل‌های ۶-الف و ب) و کمتر به شکل افشان و گاه نیز به دلیل حجم قابل توجه آن به صورت توده‌ای دیده می‌شود. این کانی شکلدار تا بی‌شکل بوده و اندازه آن بین ۰/۱ تا ۵ میلیمتر متغیر است. در برخی نمونه‌ها، هوازدگی رنگ سطحی رنگارنگ (پرطاووسی) به آن داده است. تشکیل کانی‌های ثانویه بیشتر به صورت جانشینی لبه‌ای رخ داده است، بطوریکه اغلب کانی گوتیت و کالکوسیت از لبه کالکوپیریت در حال جانشینی است (شکل ۶-پ). کانی کالکوپیریت در برخی رگه‌ها در اثر رخداد زمین‌ساختی و فعالیت دوباره گسل‌ها دچار خردشدگی شده است. این عامل که گسترش فرایند اکسایش را در پی دارد باعث شده است که گاه همه بلور به کانی‌های ثانویه تبدیل شود و یا تنها بخش کوچکی از آن باقی بماند و بافت باقیمانده را تشکیل دهد. در اثر هوازدگی این کانی به مقدار ۳۰ تا ۱۰۰ درصد به گوتیت، ۵ تا ۲۵ درصد به کالکوسیت و ۳ تا ۳۰ درصد به مالاکیت تبدیل شده است.

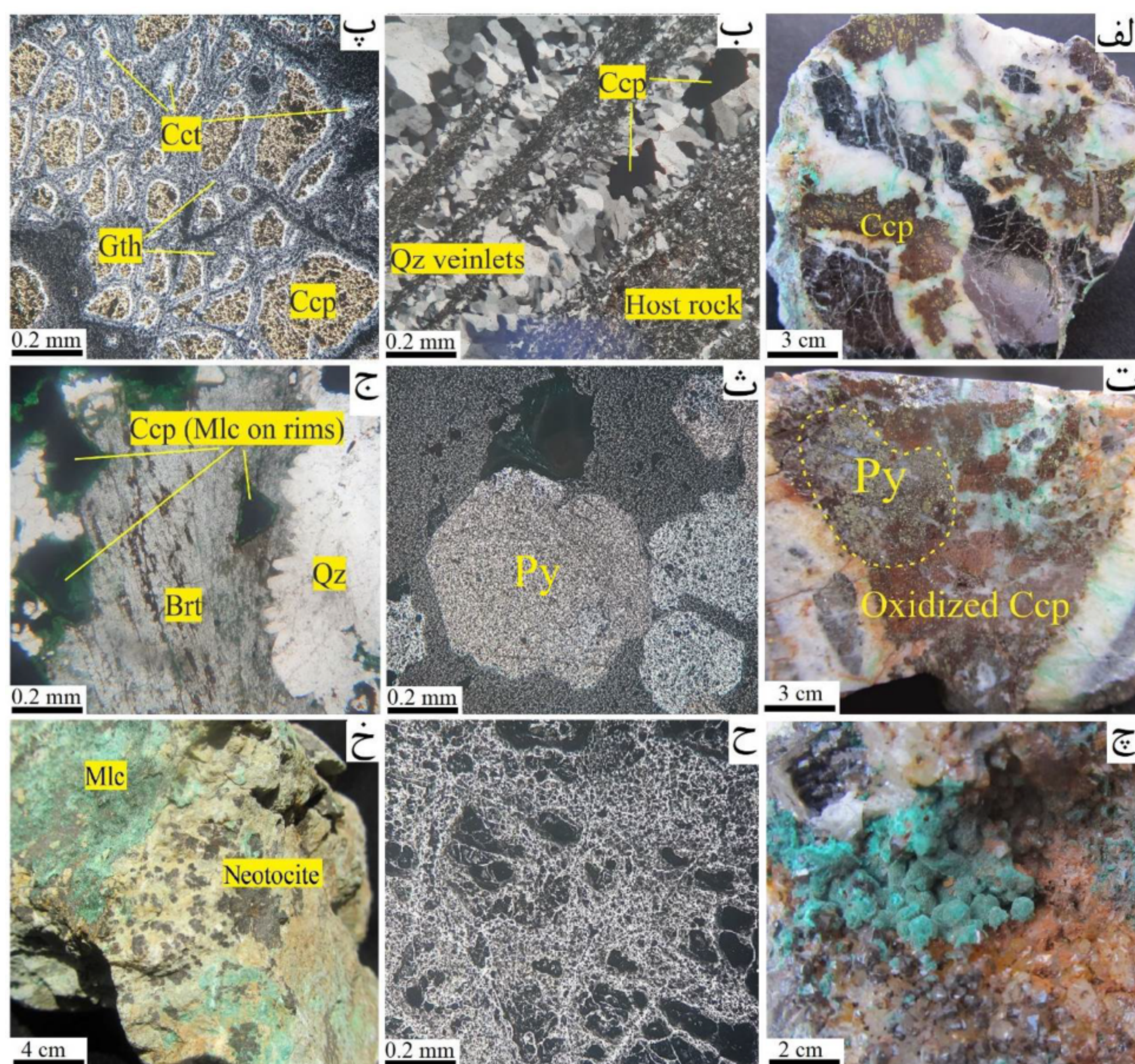
پیریت: پیریت به عنوان کانی اولیه سولفیدی، دیگر همراه کالکوپیریت اما با فراوانی بسیار کمتر (۱تا ۵ درصد) در رگه‌های سیلیسی-سولفیدی حضور دارد (شکل ۶-ت). دست کم دو نوع پیریت اسفنجی نیمه شکل دار-ریزدانه و پیریت خودشکل چندوجهی-درشت‌دانه در رگه‌ها قابل شناسایی است (شکل ۶-ث). هر دو گونه به صورت افشان و گاه انباشتی دیده می‌شوند. اندازه پیریت‌های ریزدانه و درشت دانه به ترتیب به ۰/۵ و ۴ میلیمتر می‌رسد.

کالکوسیت: فرآیند جانشینی ثانویه در کانی کالکوپیریت عامل ایجاد کالکوسیت است، بطوریکه کالکوپیریت از لبه و در راستای شکستگی‌هایی که در اثر زمین‌ساخت گسترش یافته‌اند در حال تبدیل به کالکوسیت بوده و بافت جانشینی لبه‌ای را ایجاد کرده است (شکل ۶-پ). این کانی تا حداکثر ۵ درصد حجم رگه کانه‌دار را تشکیل می‌دهد. بین ۵ تا ۲۵ درصد کالکوپیریت‌ها به کالکوسیت تبدیل شده است.



شکل ۵ الف) محل تلاقی دو گسل راستالغز میزبان رگه سیلیسی-سولفیدی در واحد شمشک (دید به سمت شمال)، ب) رگه سیلیسی-سولفیدی ستبر (دید به سمت شمال)، پ) برش به هم ریخته غنی از سیمان وحضور کوارتز با بافت شانه‌ای و مالاکیت سوزنی به عنوان سیمان قطعه‌ها.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1400.29.1.2.9]
[DOI: 10.52547/ijcm.29.1.19]



شکل ۶ الف) نمونه دستی کالکوپیریت-کوارتز در رگه سیلیسی برشی شده ، ب) بافت پرکننده فضای خالی کوارتز همراه کالکوپیریت، نور قطبیده متقاطع، XPL)، پ) بافت جانشینی ثانویه کالکوسیت و گوتیت در نتیجه اکسید شدن کالکوپیریت، نور قطبیده صفحه ای، PPL)، ت) نمونه دستی پیریت و کالکوپیریت در حال تبدیل شدن به اکسیدهای آهن در رگه سیلیسی برشی شده، ث) پیریت خودشکل، (PPL)، ج) رگچه کوارتز-کالکوپیریت (در حال تبدیل شدن به مالاکیت) و تشکیل باریت تاخیری دسته‌جارویی در فضای خالی (PPL)، چ) مالاکیت با بافت خوشه‌انگوری روی بلورهای کوارتز، ح) بافت جعبه‌ای-اسفنجی در اکسیدهای آهن (PPL) ، خ) نئوتوسیت لکه‌ای همراه مالاکیت (Ccp: کالکوپیریت، Py: پیریت، Gth: گوتیت، Cct: کالکوسیت، Mlc: مالاکیت، Brt: باریت، Qz: کوارتز [۲۵]).

مالاکیت و کریزوکلا: بخش قابل توجهی از ذخیره مس منطقه سنگان در قالب کانی مالاکیت ایجاد شده است. این کانی ۵ تا ۲۰ درصد حجم رگه‌های کانه‌دار را شامل می‌شود و از تبدیل ۳ تا ۳۰ درصدی کالکوپیریت‌ها ناشی شده است. مالاکیت به شکل رشته‌های سوزنی به صورت پرکننده فضاهای خالی روی بلورهای کوارتز (شکل ۵-پ)، جانشینی ثانویه در لبه کالکوپیریت (شکل ۶-ج)، خوشه انگوری[1] (شکل ۶-چ) و همچنین در درز و شکستگی‌ها به صورت سطحی دیده می‌شود. کانی کریزوکلا با فراوانی کم تا ۳ درصد از کانی‌سازی را شکل می‌دهد. براساس بررسی‌های صحرایی، این کانی به صورت پراکنده و رگچه‌ای در شکستگی‌های سنگ میزبان حضور دارد.

1- Botryoidal

گوتیت: بیشترین فراوانی بین کانی‌های ثانویه مربوط به کانی گوتیت است که حجم ۱۰ تا ۴۵ درصد رگه‌ها را در بر می‌گیرد. این کانی که نخستین فرآورده هوازدگی کانی‌های سولفیدی است بیشتر به صورت جانشینی از تبدیل کالکوپیریت ناشی شده است (شکل ۶-پ). بافت جعبه‌ای-اسفنجی از ویژگی‌های این کانی است (شکل ۶-ح). مقدار حجمی تبدیل کالکوپیریت به گوتیت بین ۳۰ تا ۱۰۰ درصد متغیر است.

نئوتوسیت: کانی نئوتوسیت یک سیلیکات آبدار منگنز و آهن دوظرفیتی است که در محیطهای دارای مس دو ظرفیتی، منگنز آن می‌تواند به راحتی توسط مس جایگزین شود و نئوتوسیت را تبدیل به یک کانی مس‌دار کند. این کانی اغلب در شکستگی‌ها به صورت پوشاننده سطوح و لکه‌ای با فراوانی کمتر از ۳ درصد همراه با مالاکیت دیده می‌شود (شکل ۶-خ). از نظر زمین شیمیایی، حضور این کانی در پهنه اکسایشی بیانگر پهنه‌های بیشتر اکسیدی با فراوانی پایین پیریت و عمق کم تشکیل است [۲۶]. این امر با مقادیر کم پیریت در منطقه سنگان همخوانی دارد.

هماتیت، لیمونیت و اکسیدهای منگنز: هماتیت و لیمونیت به مقدار کمتر تا ۸ درصد در مناطقی با هوازدگی شدیدتر تشکیل شده است (شکل ۶-الف). گسترش نیافتن پهنه گوسان و سطحی بودن آن (شکل ۵-الف) بیانگر عملکرد کوتاه مدت و یا قدرت اسیدی پایین محلول‌های برونزاد است. کانی‌های اکسیدی منگنز با فراوانی بیشتر تا ۷ درصد در ارتباط با کانی‌سازی با بافت خوشه انگوری، شاخه درختی و همچنین به حالت دوده‌ای دیده می‌شود که گاه در فضای خالی دیگر کانی‌ها را پوشانده‌اند.

کوارتز: کانی کوارتز مهمترین و فراوانترین باطله در منطقه سنگان است. ۴۰ تا ۱۰۰ درصد رگه‌های سیلیسی-سولفیدی توسط کوارتز پر شده است. ضخامت این رگه‌ها بین ۱۰ سانتیمتر تا ۳ متر متغیر است. این کانی بیشتر به عنوان سیمان برش گسلی به صورت پرکننده فضای خالی و همچنین رگه-رگچه‌ای با بافت شانه‌ای تشکیل شده است (شکل‌های ۵-پ، ۶-الف و ب). در برخی رگه‌ها، کوارتزهای شیری رنگ به دلیل حجم بالا و نبود بافت‌های دیگر به شکل توده‌ای دیده می‌شود (شکل ۵-ب). قرارگیری کوارتز در لبه فضاهای خالی و رگه-رگچه‌ها بیانگر تقدم تشکیل آن نسبت به سایر کانی‌هاست (شکل ۷).

باریت: کانی باریت با گسترش کم همراه با رگه کانی‌سازی سولفیدی دیده می‌شود. باریت با فراوانی حدود ۲ درصد با درشت بلورهای دسته جارویی (شکل ۶-ج)، لوحه‌ای و همچنین به شکل رگچه‌های ریزبلور ۰/۵ تا ۳ میلیمتر دیده می‌شود. این کانی به صورت پرکننده فضای خالی در فاز تاخیری کانه‌زایی پس از تشکیل کانه‌های اصلی شکل گرفته است.

Mineral	Hypogene mineralization		Supegene and oxidized mineralization
	Stage I	Stage II	
Chalcopyrite			
Pyrite			
Quartz			
Barite			
Chalcocite			
Malachite			
Chrysocolla			
Neotocite			
Goethite			
Hematite			
Limonite			
Mn oxides			

شکل ۷ توالی همبرزایی کانی‌سازی منطقه اکتشافی سنگان.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1400.29.1.2.9]
[DOI: 10.52547/ijcm.29.1.19]

توالی همبرزایی

کانه‌زایی اولیه در منطقه اکتشافی سنگان در دو مرحله رخ داده است. در مرحله نخست، در اثر فرایند گسلش، فضای مناسب برای حرکت محلول‌های عمقی به بالا فراهم شده است و کانی-های پیریت و کالکوپیریت به همراه کوارتز در فضاهای خالی پهنه گسلی ته‌نشست کرده‌اند. در مرحله بعد، در اثر فعالیت دوباره گسل‌ها، محلول دارای باریت در فضاهای باقی‌مانده و همچنین در رگچه‌ها تشکیل شده است. پس از کانه‌زایی اولیه، اثر هوازدگی در رخنمون‌های سطحی به صورت اکسایش و واکنش‌های شیمیایی در پهنه برونزاد بین کانه‌ها و محیط پیرامون در سطح و عمق باعث تبدیل کانی‌های اولیه به کانی-های ثانویه از جمله کالکوسیت، گونه‌های کربناتی-اکسیدی مالاکیت و کریزوکلا به همراه اکسید و هیدروکسیدهای آهن (گوتیت، هماتیت، لیمونیت) شده است (شکل ۷).

زمین شیمی رگه‌ها

نتایج تجزیه زمین‌شیمی ۱۴ نمونه برداشت شده به روش خرده سنگی به همراه جایگاه آن‌ها در شکل ۴ نشان داده شده است. بالاترین عیار مربوط به عنصر مس و بین ۶۷ گرم در تن تا بیش از ۵ درصد متغیر است. با توجه به فراوانی کالکوپیریت، مالاکیت و به مقدار کمتر کالکوسیت وکریزوکلا در رگه‌ها، چنین عیاری مورد انتظار است. عیارسنجی طلا برای ۶ نمونه مقداری بین ۵۵ تا ۴۱۳ میلی‌گرم در تن را نشان می‌دهد که به احتمال بسیار در ارتباط با کانی‌های سولفیدی است. مقدار آرسنیک بین ۲/۵ تا بیش از ۱۰۰ گرم در تن متغیر است. مقدار سرب در گستره ۸ تا ۱۷۹ و روی بین ۱ تا ۶۲ گرم در تن در تغییر است که مقدار قابل توجهی محسوب نمی‌شود و کانی سرب یا روی‌داری دیده نشده است. مقدار باریم با توجه به حضور کانی باریت بین ۵۷ تا ۲۳۸۸ گرم در تن ثبت شده است. بیشینه مقدار منگنز به ۱۱۲۱ گرم در تن می‌رسد که به دلیل حضور اکسیدهای منگنز است. مقدار آهن تا ۸ درصد در ارتباط با مقدار کانی‌های کالکوپیریت و اکسیدهای آهن است. سایر عناصر فلزی ناهنجاری قابل ملاحظه‌ای نشان نمی‌دهند. جدول ۱ همبستگی دو متغیره پیرسون محاسبه شده بین عناصر مهم را نشان می‌دهد. بر این اساس، به طور کلی عناصر مس، سرب، روی، نقره و مولیبدن نسبت به هم همبستگی خوبی نشان می‌دهند. در حالیکه عناصر طلا و آرسنیک نسبت به هم و نسبت به دیگر عناصر همبستگی پایینی داشته و یا گاه میل به همبستگی معکوس (۱-) دارند. برای مثال، همبستگی منفی طلا و سرب فزونی طلا را در مکان‌های با غلظت پایین سرب نشان می‌دهد همچنین، مقادیر همبستگی نزدیک به صفر باریم با دیگر عناصر ارتباط نداشتن کانه‌زایی باریت با دیگر کانه‌های فلزی را بیان می‌کند که با توجه به تشکیل آن در مرحله‌ای جداگانه این همبستگی طبیعی است. نکته مهم در بررسی‌های آماری، وابستگی اعتبار روش به کار برده شده به تعداد نمونه‌هاست. به این منظور، با افزایش تعداد نمونه‌ها برداشت شده از منطقه سنگان می‌توان تفسیر دقیق و معتبرتری پیرامون زمین شیمی رگه‌های کانه‌دار ارائه نمود.

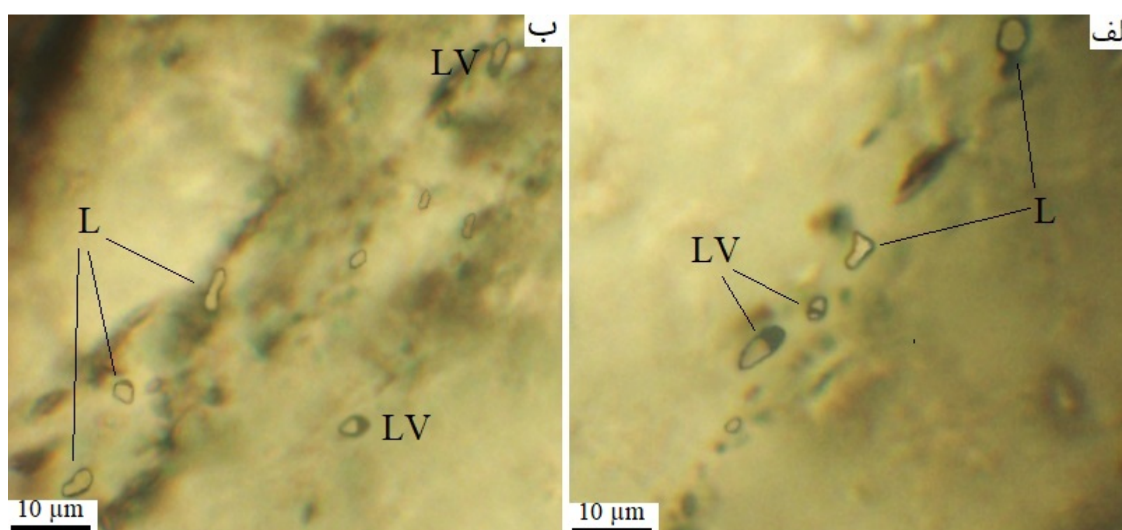
جدول ۱ ماتریس همبستگی پیرسون عناصر مهم در رگه‌های منطقه مورد بررسی (همبستگی‌های بالا پر رنگ شده‌اند).

	Cu	Au	As	Ag	Pb	Zn	Mo	Ba
Cu	۱							
Au	-۰/۲	۱						
As	۰/۳۴	-۰/۱۷	۱					
Ag	۰/۵۹	۰/۴	-۰/۱	۱				
Pb	۰/۵۰	۰/۴	۰/۱۳	۰/۵۹	۱			
Zn	۰/۸۸	-۰/۲۹	۰/۱۷	۰/۵۹	۰/۷	۱		
Mo	۰/۷۱	-۰/۳۶	۰/۶۱	۰/۶	۰/۶۳	۰/۶۶	۱	
Ba	-۰/۲	-۰/۱۸	-۰/۱۵	۰/۰۳	۰/۱۸	-۰/۰۳	-۰/۱۴	۱

سیال‌های درگیر

بررسی سیال‌های درگیر نتایج مهمی در رابطه با ماهیت فیزیکوشیمیایی از جمله دما و شوری محلول کانه‌دار را در پی دارد و از مهمترین ابزارها برای تعیین خاستگاه کانسارهای گرمابی محسوب می‌شود. در منطقه سنگان، کوارتز و باریت کانی‌های باطله همراه با کانی‌سازی هستند. با توجه به فراوانی این کانی‌ها، سیال‌های درگیر برای ۹ مقطع دوبر صیقل کوارتز و ۱ مقطع باریت بررسی شد. در مجموع، دماسنجی به روش گرمایش برای ۱۳۸ سیال درگیر و تعیین نوع نمک‌ها و مقدار شوری به روش سرمایش برای ۱۱۲ سیال درگیر انجام شد. براساس نتایج سنگ‌نگاری سیال‌های درگیر کوارتز، بیشتر آنها شکل‌دار و به صورت بیضوی، دایره‌ای، مخروطی و کشیده و کمتر به صورت بی‌شکل هستند و اندازه آن‌ها بین ۳ تا ۱۰ میکرون متغیر است (شکل ۸). سیال های درگیر باریت نیز به شکل بیضوی، کشیده و گاه بی‌شکل و ۳ تا ۸ میکرون هستند. براساس تقسیم‌بندی‌های پیشنهادی [۲۷، ۲۸]، سیال‌های درگیر مورد بررسی هم در کوارتز و هم در باریت، از نوع دوفازی غنی از مایع (LV) و تک فاز مایع (L) هستند (شکل ۸). براساس بررسی‌های انجام شده، سیال‌های درگیر ثانویه نیز در کوارتز حضور دارند و اندازه آنها تا ۳ میکرون می‌رسد.

آزمایش‌های دماسنجی، تعیین نوع محلول و مقدار شوری برای سیالات درگیر اولیه نوع LV انجام شد. دمای همگن‌شدگی (T_h) در سیال‌های درگیر کوارتز ۲۷۴ تا ۳۱۸ درجه سانتیگراد با میانگین ۲۷۶ درجه‌سانتی‌گراد و در باریت ۲۰۰ تا ۲۵۹ درجه‌سانتیگراد با میانگین ۲۱۷ درجه‌سانتیگراد است (شکل ۹-الف). نخستین دمای ذوب‌شدگی (T_{fm}) برای کوارتز ۴۶/۸- تا ۴۲/۱- درجه سانتیگراد با میانگین ۴۴/۹- درجه سانتیگراد و برای باریت ۴۴- تا ۴۳- درجه سانتیگراد با میانگین ۴۳/۴۵- درجه سانتیگراد به دست آمد (شکل ۹-ب). این مقادیر حضور احتمالی نمک‌های NaCl و $CaCl_2$ در سیال‌های درگیر اولیه را نشان می‌دهد [۲۸]. دمای ذوب نهایی (T_m) برای سیال‌های درگیر کوارتز ۸/۴- تا ۴/۶- درجه‌سانتیگراد با میانگین ۶/۴- درجه سانتیگراد و برای باریت ۷/۸- تا ۶/۸- درجه‌سانتیگراد با میانگین ۷/۲- درجه‌سانتیگراد اندازه‌گیری شد. محاسبه مقدار شوری براساس سامانه H_2O-NaCl، مقداری بین ۷/۳ و ۱۲ درصد وزنی با میانگین ۹/۷ درصد وزنی برای سیال‌های درگیر کوارتز و ۱۰/۲ تا ۱۱/۴ با میانگین ۱۰/۷ درصد وزنی برای سیال‌های درگیر باریت را نشان می‌دهد (شکل ۹-پ). چگالی این سیال‌های برپایه سامانه H_2O-NaCl، برای کوارتز ۰/۸ تا ۰/۹ با میانگین ۰/۸۴ گرم بر سانتیمتر مکعب و برای باریت ۰/۸۸ تا ۰/۹۵ با میانگین ۰/۹۲ گرم بر سانتیمتر مکعب بدست آمد (جدول ۲، شکل ۹-ت).

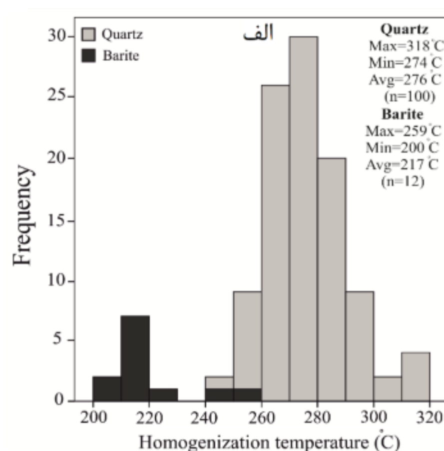


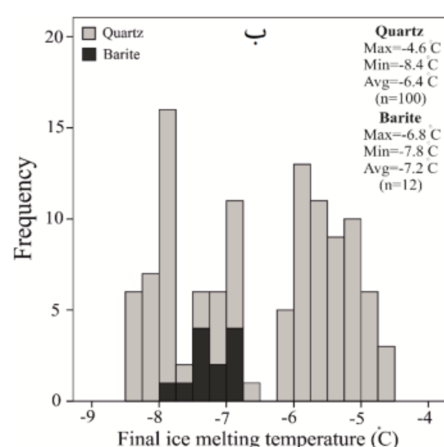
شکل ۸ سیال‌های درگیر کوارتز در رگه‌های کوارتز-سولفیدی: الف و ب) سیال‌های دو فازی غنی از مایع (LV) بیضی شکل و تک فازی مایع (L).

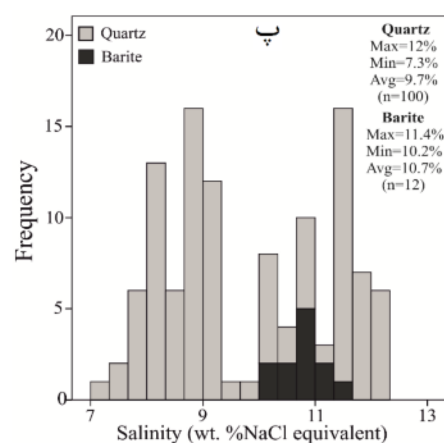
[DOR: 20.1001.1.17263689.1400.29.1.2.9]
[DOI: 10.52547/ijcm.29.1.19]

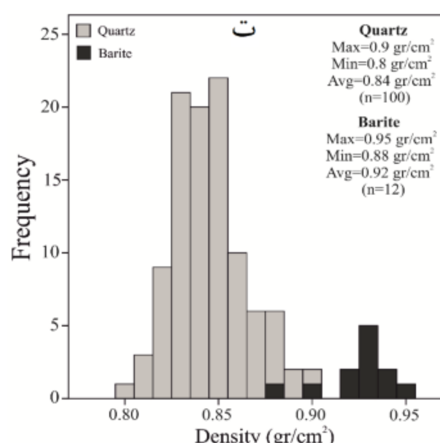
جدول ۲ نتایج ریزدماسنجی سیال های درگیر نوع LV در کوارتز و باریت

ردیف	شماره مقطع	کانی میزبان	دمای همگن شدگی (°C)	نخستین دمای ذوب یخ (°C)	آخرین دمای ذوب یخ (°C)	شوری(wt% NaCl)	چگالی(g/cm3)
۱	Sa-F1	کوارتز	۲۵۴ تا ۲۵۷	-۴۶٫۱ تا -۴۵	-۵٫۶ تا -۴٫۶	۷٫۳ تا ۸٫۶	۰٫۸۳ تا ۰٫۸۶
۲	Sa-F2	کوارتز	۲۵۶ تا ۲۷۹	-۴۶٫۸ تا -۴۵٫۹	-۷٫۳ تا -۶٫۶	۹٫۹ تا ۱۰٫۸	۰٫۸۵ تا ۰٫۸۸
۳	Sa-F3	کوارتز	۲۶۰ تا ۲۸۳	-	-	-	-
۴	Sa-F4	کوارتز	۲۷۰ تا ۲۸۵	-	-	-	-
۵	Sa-F5	کوارتز	۲۶۰ تا ۲۸۸	-۴۴ تا -۴۵٫۱	-۷٫۷ تا -۸٫۴	۱۱٫۳ تا ۱۲٫۱	۰٫۸۵ تا ۰٫۹۰
۶	Sa-F6	کوارتز	۲۶۹ تا ۲۹۴	-۴۴٫۳ تا -۴۵٫۳	-۵ تا -۵٫۷	۷٫۸ تا ۸٫۶	۰٫۸۰ تا ۰٫۸۴
۷	Sa-F7	کوارتز	۲۸۸ تا ۳۱۸	-۴۳ تا -۴۴٫۴	-۷٫۸ تا -۸٫۴	۱۱٫۴ تا ۱۲٫۱	۰٫۸۱ تا ۰٫۸۵
۸	Sa-F8	کوارتز	۲۶۴ تا ۲۸۵	-۴۲٫۱ تا -۴۴٫۵	-۵٫۴ تا -۶٫۱	۸٫۴ تا ۹٫۳	۰٫۸۳ تا ۰٫۸۵
۹	Sa-F9	کوارتز	۲۶۸ تا ۲۸۶	-۴۴٫۱ تا -۴۵٫۳	-۵٫۴ تا -۶٫۱	۸٫۴ تا ۹٫۴	۰٫۸۲ تا ۰٫۸۵
۱۰	Sa-F10	باریت	۲۰۰ تا ۲۵۹	-۴۳ تا -۴۴	-۶٫۸ تا -۷٫۸	۱۰٫۲ تا ۱۱٫۴	۰٫۸۸ تا ۰٫۹۵









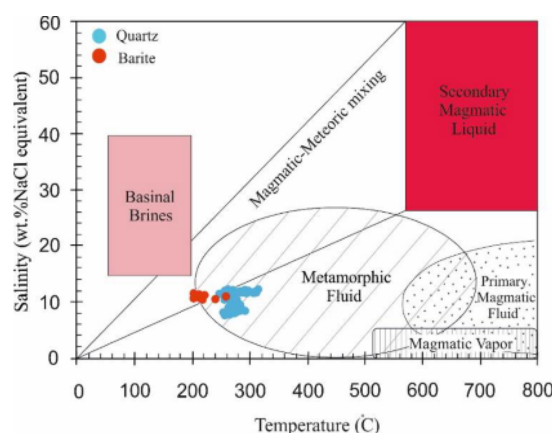
شکل ۹ نمودارهای ستونی برای: الف) دمای همگن‌شدگی، ب) آخرین دمای ذوب یخ، پ) شوری و ت) چگالی سیال‌های درگیر.

دگرگونی و تکامل سیال کانه‌دار

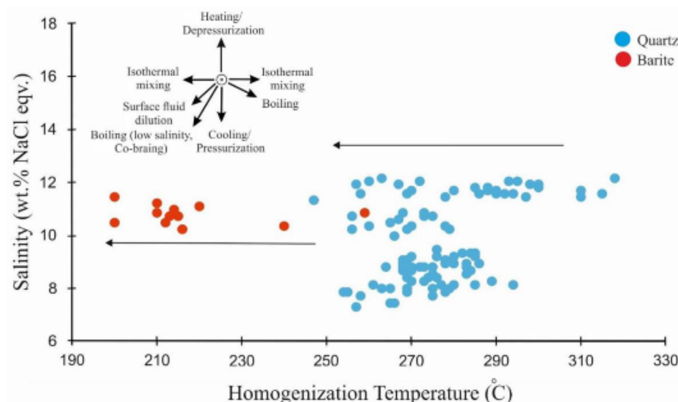
بررسی‌های سیال‌های درگیر و کانه‌نگاری، کانی‌سازی اولیه را در دو مرحله (فاز اصلی و فاز تاخیری) نشان می‌دهد. در مرحله نخست، که فاز اصلی کانه‌زایی است، از آنجا که توالی همبرزایی همزمانی تشکیل کوارتز با کالکوپیریت و پیریت را نشان می‌دهد، ریزدماسنجی سیال‌های درگیر کوارتز بیانگر ته‌نشست سولفیدها از محلولی با دمای ۲۷۴ تا ۳۱۸ درجه سانتیگراد و شوری ۷٫۳ تا ۱۲ درصد وزنی معادل نمک طعام است. در مرحله تاخیری باریت به شکل پرکننده فضای خالی و رگچه‌ای از سیالی با دمای ۲۰۰ تا ۲۵۹ درجه سانتیگراد و شوری ۱۰٫۲ تا ۱۱٫۴ درصد وزنی معادل نمک طعام تشکیل شده است. هیچ اثری از رخداد پدیده جوشش طی ته‌نشینی کانی‌ها نه در بررسی‌های بافتی رگه‌ها و نه در سنگ‌نگاری سیال‌های درگیر دیده نشد. از این رو با توجه به مقدور نبودن تصحیح فشار

ستون چینه‌ای طی کانی‌سازی، دمای همگن‌شدگی بدست آمده کمترین دمای تشکیل ذخیره معدنی در نظر گرفته می‌شود. البته، هدنکوئیست و هنلی [۲۹] معتقدند که نبود مشخصه‌های جوشش (برای مثال، سیال‌های غنی از بخار) به الزام شاهدی بر رخ ندادن پدیده جوشش نیست.

با توجه به نمودار دما-شوری [۳۰]، می‌توان تا حدی خاستگاه سیال‌های کانسارساز را پیش‌بینی کرد که بر این اساس، سیال‌ها در گستره آب دگرگونی قرار دارند (شکل ۱۰). اگرچه با توجه به دگرگونی ناحیه‌ای سازند شمشک، رگه‌های سیلیسی شیری و عقیم هم‌راستا با لایه‌بندی سنگ میزبان دیده می‌شوند، اما رگه‌های کانه‌دار آشکارا به صورت روزادی پس از دگرگونی شکل گرفته‌اند و رگه‌های سیلیسی عقیم را قطع می‌کنند. در نتیجه، آب دگرگونی نقشی در تامین سیال کانه‌ساز نداشته و مناسبترین فرضیه آمیختگی آب جوی و آب ماگمایی است. در فرایند ته‌نشست سولفیدها، انتقال گوگرد و فلزات گرم بر سانتیمتر مکعب در یک سیال اغلب ممکن نیست. در نتیجه، گوگرد و فلزات کانه‌ساز در قالب سیال‌های جداگانه حمل شده و سپس با هم در می‌آمیزند [۳۱]. فرایندهای جوشش و آمیختگی سیال‌ها مهمترین عوامل ته‌نشینی عناصر کانسارساز هستند که باعث اشباع سیال گرمابی و سرانجام کانی‌سازی می‌شوند [۳۲]. افزون بر این، اغلب روندهای سردشدگی و رقیق‌شدگی در کانسارهای فراگرمایی دیده می‌شود [۳۳]. در نمودار دمای همگن‌شدگی نسبت به شوری [۳۲]، نقش فرایند آمیختگی سیال‌ها و رقیق‌شدگی دیده می‌شود (شکل ۱۱). سیال‌های درگیر کانی کوارتز در این نمودار را می‌توان به دو دسته هم دما ولی با شوری متفاوت تقسیم کرد. آمیختگی سیال ماگمایی (دما و شوری بالا) با سیال جوی (دما و شوری پایین) همراه با رقیق‌شدگی سیال گرمابی در حال صعود توسط سیال جوی (آب زیرزمینی) سرد و رقیق که از فضای گسل‌ها به سمت پایین هدایت می‌شود، موجب افت دما، ناپایداری کمپلکس‌های حمل کننده عناصر و سرانجام ته‌نشست کانی‌ها می‌شوند. سیال‌های درگیر در باریت نیز که دما و شوری پایین‌تری نشان می‌دهند، بیانگر نقش فرایند آمیختگی سیال در تشکیل باریت هستند (شکل ۱۱).



شکل ۱۰ نمودار دمای همگن‌شدگی نسبت به شوری برای تعیین خاستگاه سیال‌های کانه‌ساز منطقه سنگان (گستره‌های تعریف شده برگرفته از مرجع [۳۰] هستند).



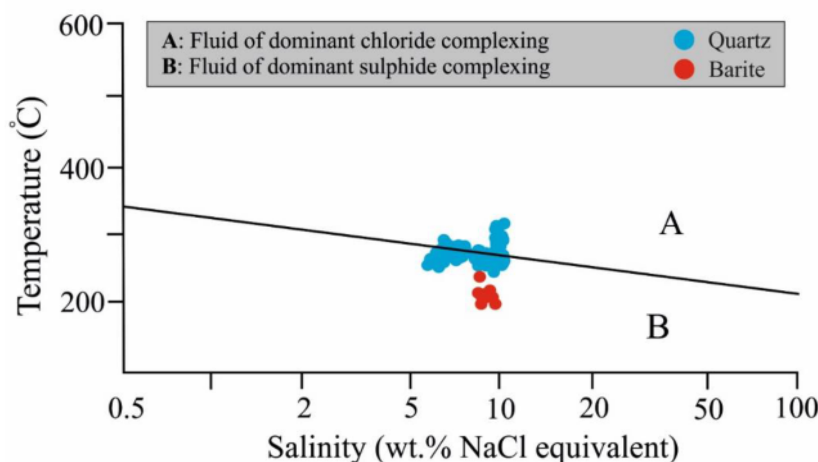
شکل ۱۱ نمودار دمای همگن‌شدگی-شوری برای تعیین روند تکامل سیال در منطقه سنگان (برگرفته از مرجع [۳۲]).

[DOR: 20.1001.1.17263689.1400.29.1.2.9]
[DOI: 10.52547/ijcm.29.1.19]

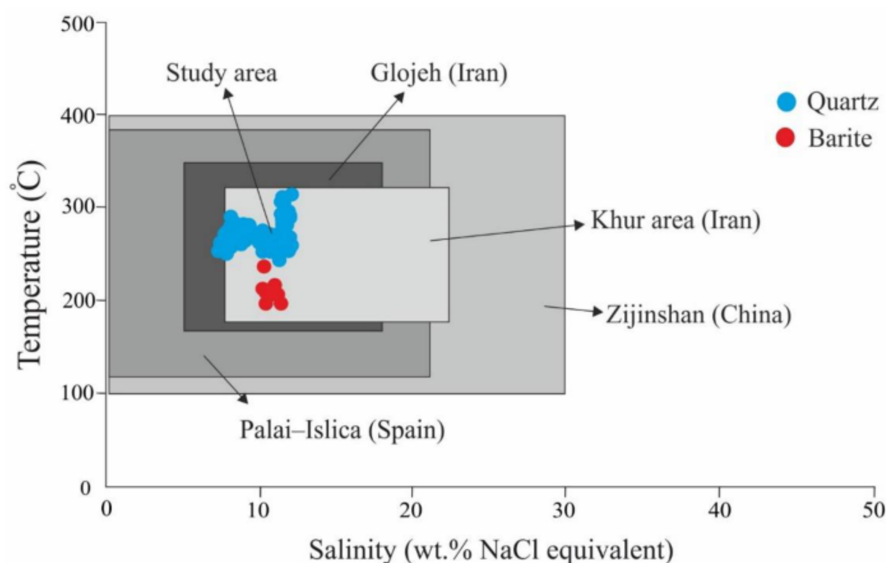
در کانسارهای فراگرمایی، کمپلکس‌های کلریدی نقش مهمتری در حمل فلزات پایه دارند، در حالیکه برای طلا کمپلکس بی-سولفیدی اهمیت بیشتری دارد [۳۴]. از سوی دیگر، کمپلکس-های کلریدی و بی‌سولفیدی به ترتیب در دماهای بالاتر و پایین‌تر از ۳۰۰ درجه سانتیگراد غالب هستند [۳۴]. در نمودار تعیین کمپلکس حمل کننده فلزات [۳۵]، اگرچه دو کمپلکس نام برده در فرایند کانه‌زایی نقش داشته‌اند، اما کمپلکس بی-سولفیدی نقش مهمتری را در حمل و ته‌نشست مس و طلا ایفا می‌کند (شکل ۱۲). در شکل ۱۳، دما و شوری کانه‌سازی سنگان با چند کانسار فراگرمایی شناخته شده در ایران و جهان مقایسه شده است [۳۶-۳۹]. بر این اساس، دما و شوری سیال-های درگیر منطقه سنگان به خوبی در گستره مشترک این کانسارها قرار دارد.

برداشت

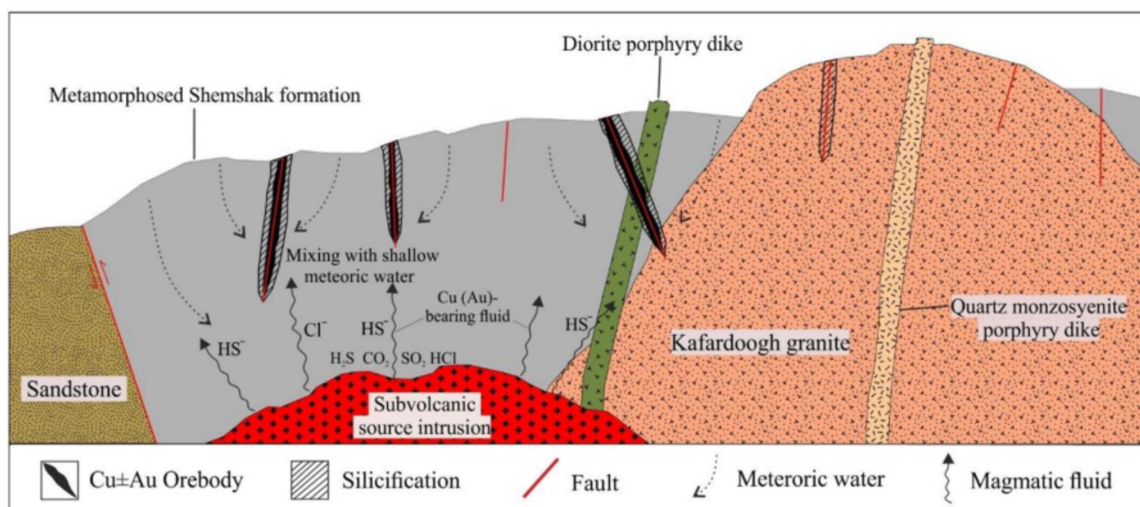
۱- کانی‌سازی منطقه سنگان بیشتر در رسوب‌های دگرگون‌شده سازند شمشک و کمتر در توده گرانیتی کافردوغ قرار دارد. دایک‌های منطقه این واحدها را قطع کرده و رگه‌های کانه‌دار دایک‌های منطقه را نیز قطع می‌کنند. بنابراین از نظر زمانی، کانه‌زایی پس از ظهور آخرین فعالیت ماگمایی (دایک‌ها) در منطقه رخ داده است. بنابراین، این توده‌های نفوذی خاستگاه سیال‌های کانه‌دار نیستند و به نظر می‌رسد که محلول‌های ماگمایی-گرمابی تامین‌کننده عناصر فلزی کانسارساز از توده-های نیمه عمیق مربوط به فاز آذرین نفوذی در ترشیری سرچشمه می‌گیرند (شکل ۱۴).



شکل ۱۲ نمودار شوری-دمای همگن‌شدگی برای تعیین کمپلکس فلزی [۳۵].



شکل ۱۳ مقایسه دما و شوری محلول کانه‌دار منطقه سنگان با گستره دما-شوری برخی از کانسارهای فراگرمایی ایران و جهان [۳۶- ۳۹].



شکل ۱۴ طرحواره تشکیل کانی‌سازی در منطقه اکتشافی سنگان.

۲- پژوهش‌های مختلف پیرامون کانسارهای فراگرمایی [۴۰، ۴۱] نقش گسل‌های عمده را در کنترل ناحیه‌ای موقعیت کانسارها نشان می‌دهد، اما بیشتر ذخیره‌های معدنی بر این گسل‌ها قرار نمی‌گیرند، بلکه وابسته به شاخه‌ها و انشعاب‌های فرعی گسل‌های عمده هستند. رخداد کانه‌زایی سنگان نیز به شکل روزادی و با کنترل ساختاری در راستای گسل‌ها و شکستگی‌های منشعب از گسل درونه شکل گرفته است. انواع گسل‌های عادی، معکوس و راستالغز در این ناحیه حضور دارند، اما گسل‌های سازنده کانی‌سازی از نوع راستالغز بوده و گذرگاه مناسبی برای انتقال و مهاجرت محلول‌های کانه‌دار از عمق به سطوح بالاتر هستند، افزون بر این، مکان مناسبی برای جایگیری ذخیره معدنی فراهم کرده‌اند.

۳- سنگ میزبان توسط عملکرد گسل‌ها برشی شده و سپس توسط کوارتز به همراه کالکوپیریت و پیریت ناشی از محلول کانه‌ساز به صورت بافت پرکننده فضای خالی (سیمان برش گسلی) فضای بین قطعه‌ها را پر کرده است. وجود شکستگی و خردشدگی در سولفیدهای اولیه و آثار خش‌لغز بر رگه‌های اولیه فعالیت زمین‌ساختی چند مرحله‌ای را نشان می‌دهد.

۴- سیلیسی شدن دگرسانی مهم همراه با کانی‌سازی است که در حریم رگه‌های کوارتزی گسترش دارند. این امر نشان‌دهنده غنی بودن محلول کانه‌ساز از سیلیس است (شکل ۱۴).

۵- زمین شیمی رگه‌ها افزون بر تمرکز قابل انتظار عناصری چون مس، آهن و باریم، ناهنجاری قابل توجهی از طلا را تا ۰٫۴ گرم در تن نشان می‌دهد که با توجه به مشاهده نشدن طلای آزاد در بررسی‌های میکروسکوپی، این عنصر به احتمال بسیار در ساختار سولفیدها قرار دارد. از سویی، همبستگی پایین مس و طلا، احتمال حضور طلا در ساختار کالکوپیریت را پایین می‌آورد. از این رو، ممکن است که طلا در ساختار پیریت و یا به صورت ذرات میکرونی در رگه سیلیسی وجود داشته باشد که در بررسی‌های میکروسکوپی به راحتی قابل تشخیص نیست.

۶- بررسی‌های سیال‌های درگیر بیانگر تغییرات دمایی سیال کانه‌ساز بوده که طی دو فاز کانه‌زایی بین ۲۷۴ تا ۳۱۸ درجه سانتیگراد برای سولفیدها و ۲۰۰ تا ۲۵۹ درجه سانتیگراد برای باریت رخ داده است. شوری سیال در هر دو مورد کم تا متوسط (کمتر از ۱۲ درصد وزنی معادل نمک طعام) به دست آمد. فرایندهای آمیختگی و رقیق‌شدگی توسط آب‌های جوی با دما و شوری پایین نقش اصلی را در ته‌نشست مس و طلا از کمپلکس‌های بی‌سولفیدی و کمتر کلریدی ایفا کرده‌اند (شکل ۱۴).

با توجه به شواهد بیان شده، کانی‌سازی سنگان را می‌توان یک کانی‌سازی رگه‌ای-گرمابی از نوع مس±طلا فراگرمایی معرفی کرد. طرحواره کانی‌سازی در گستره معدنی سنگان در شکل ۱۴ نشان داده شده است.

قدردانی

این مقاله با حمایت مالی دانشگاه فردوسی مشهد در قالب طرح پژوهشی شماره ۳٫۴۸۹۰۷ مورخ ۱۳۹۷/۱۱/۳۰ انجام شده است. نویسندگان از مالک گستره معدنی سنگان جناب آقای داوطلب و آقایان حسینی و سعادتی برای همکاری در برداشت‌های صحرایی قدردانی می‌کنند.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1400.29.1.2.9]
[DOI: 10.52547/ijcm.29.1.19]

مراجع

[1] Karimpour M. H., Malekzadeh Shafaroudi A., Mazloumi Bajestani A., Keith Schader R., Stern Ch. R., Farmer L., Sadeghi M., "*Geochemistry, geochronology, isotope and fluid inclusion studies of the Kuh-e-Zar deposit, Khaf-Kashmar-Bardaskan magmatic belt, NE Iran: Evidence of gold-rich iron oxide–copper–gold deposit*", Journal of Geochemical Exploration 183 (2017) 58-78.

[2] Karimpour M.H., Saadat S., Malekzadeh Shafaroudi A., "*Exploration of Cu-Au Iron Oxide and Magnetite Ore Deposits in the VolcanicPlutonic Khaf-Kashmar-Bardsank Belt*", 21th National Geosciences conference, Tehran (2003) (In Persian).

[3] Mazloumi A.R., Karimpour M.H., Rassa I., Rahimi B., Vosoughi Abedini M., "*Kuh-E-Zar Gold Deposit in Torbat-e-Heydaryeh «New Model of Gold Mineralization»*", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 16 (2008) 363-376 (In Persian).

[4] Karimpour M.H., Malekzadeh Shafaroudi A., "*Skarn geochemistry – mineralogy and petrology of source rock Sangan Iron mine, Khorasan Razavi, Iran*", Scientific Quarterly Journal Geosciences 65 (2008) 108–125 (In Persian).

[5] Golmohammadi A., Karimpour M.H., Malekzadeh Shafaroudi A., Mazaheri S.A., "*Alteration-mineralization, and radiometric ages of the source pluton at the Sangan iron skarn deposit, northeastern Iran"*, Ore Geology Reviews 65 (2015) 545–563.

[6] Boomeri M., "*Petrography and geochemistry of Sangan Fe-Skarn deposit and its igneous rocks, NE Iran*", Ph.D. Thesis, University of Akita, Akita, Japan (1998) 226 pp.

[7] Karimpour M.H., Malekzadeh Shafaroudi A., "*Comparison of the geochemistry of source rocks at Tannurjeh Au-bearing magnetite and Sangan Au-free magnetite deposits, Khorasan Razavi, Iran*", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 14 (2006) 3-26 (In Persian).

[8] Hosseini R., Karimpour M.H., Malekzadeh Shafaroudi A., "*Petrography, geochemistry, U-Pb dating and Sr-Nd isotopes of igneous rocks in Tannurjeh porphyry Au-Cu prospect area (NE Kashmar)*", Petrology 33 (2018) 45-70 (In Persian).

[9] Karimpour M.H., Saadat S., Malekzadeh Shafaroudi A., "*Geochemistry, petrology and mineralization of Tanurjeh Au-Cu porphyry*", Journal of Science (University of Tehran) 33 (2005) 173-185(In Persian).

[10] Yousefi L., Karimpour M.H., Haidarian Shahri M.R., "*Geology, mineralogy, fluid inclusion thermometry and ground magnetic of Shahrak Magnetite-Specularite Cu-Au prospecting area, Torbat-e-Heydariyeh, Iran*", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 16 (2008) 505-516 (In Persian).

[11] Alaminia Z., Karimpour M.H., Heydariyan Shahri., M.R; "*Geology, alteration, mineralization and geochemical studies in Kalate teymur area, northeastern Iran*", Journal of Economic Geology 2 (2010-2011) 215-234 (In Persian).

[12] Almasi A., Karimpour M.H., Ebrahimi Nasrabadi Kh., Rahimi B., KlÖtzli U., Francisco Santos J.,"*Geology, mineralization, U-Pb dating and Sr-Nd isotope geochemistry of intrusive bodies in northeast of Kashmar*", Journal of Economic Geology 7 (2015) 69-90 (In Persian).

[13] Almasi A., Karimpour M.H., Hattori K., Santos J.F., Ebrahimi Nasrabadi Kh., Rahimi B., "*Au bearing magnetite mineralizaion in Kashmar (alteration, mineralization geochemistry, geochemistry and fluid inclusions); and Tectono-magmatism of northeast of Iran*", Journal of Economic Geology 8 (2016-2017) 569-592 (In Persian).

[14] Taghadosi H., Malekzade Shafaroudi A., "*Mineralogy, alteration, geochemistry and fluid inclusion study of iron oxide-copper mineralization in Namagh area, northeast of Kashmar*", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 26 (2018) 541-554 (In Persian).

[15] Taghadosi H., Malekzade Shafaroudi A., "*Evidence of probable Cu-Au mineralization in Namagh area, Northeast of Kashamr: Alteration, mineralization, geochemistry and fluid inclusion studies*", Scientific Quarterly Journal Geosciences 108 (2018) 105–114 (In Persian).

[16] Boroozi niyat B., Malekzade Shafaroudi A., Heydariyan Shahri., M.R., "*Mineralogy, geochemistry and fluid inclusion study in Zaveh copper occurrence, southeast of Torbat-e-Heydarieh*", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 27 (2019) 3-18 (In Persian).

[17] Sahandi M.R., Soheily M., Sadeghi M., Delavar S.T., Jafari Rad A., "Geological Map of Iran", Scale 1:1,000,000, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran. (2002).

[18] Lecumberri-Sanchez P., Steel-MacInnis M., Bodnar R.J., "*A numerical model to estimate trapping conditions of fluid inclusions that homogenize by halite disappearance*", Geochim Cosmochim Acta 92 (2012) 14-22.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1400.29.1.2.9]

[DOI: 10.52547/ijcm.29.1.19]

[DOR: 20.1001.1.17263689.1400.29.1.2.9]
[DOI: 10.52547/ijcm.29.1.19]

[31] Sverjensky D.A., "*The origin of a Mississippi Valley-type deposit in the Viburnum Trend, Southeast Missouri*", Economic Geology 76 (1981) 1848–1872.

[32] Wilkinson J.J., "*Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits*", Lithos 55(2001) 229-272.

[33] Rossetti P., Colombo F., "*Adularia–sericite gold deposits of Marmato Caldas, Colombia : field and petrographic data*", Geological Society of London, Special Publications 155 (1999) 167-182.

[34] Seward T.M., Barnes H.L., "*Metal transport by hydrothermal ore fluids*", in Barnes H.L., "*Geochemistry of hydrothermal ore deposits*", New York, John Wiley and Sons (1997) 435–486.

[35] Pirajno F., "*Hydrothermal processes and mineral system*", New York, Springer Science (2009) 1273 pp.

[36] So C.S., Zhang D.Q., Yun S.T., Li D.X., "*Alteration-mineralization zoning and fluid inclusions of the high sulfidation Eepithermal Cu-Au mineralization at Zijinshan, Fujian province, China*", Economic Geology 93 (1998) 961-980.

[37] Murales Ruano S., Carrillo Rosua F., Hach Ali P.F., De La Fuente Chacon., F., Contreras Lopez E., "*Epithermal Cu–Au mineralization in the Palai Islica deposit, Almeria, southeastern Spain: fluid-inclusion evidence for mixing of fluids as a guide to gold mineralization*", The Canadian Mineralogist 38 (2000) 553-565.

[38] Javidi Moghaddam, M., Karimpour, M.H., Ebrahimi Nasrabadi, K., Malekzadeh Shafaroudi, A., Haidarian Shahri, M.R., "*Mineralogy, geochemistry, fluid inclusion and oxygen isotope investigations of epithermal Cu ± Ag veins of the Khur area, Lut block, eastern Iran*", Acta Geologica Sinica (English Edition), 92 (2018) 1-1.

[39] Mehrabi B., Tale Fazel E., Ghasemi Siani M., Eghbali M.A., "*The study on genesis of Glojeh Cu-Au vein deposit (north of Zanjan) based on evidence from mineralogy, geochemistry and fluid inclusion*", Journal of Science. University of Tehran 35 (2007) 185-199.

[40] Fernandez H.E., Damasco F.V., "*Gold deposition in the Baguio Gold District and its relationship to regional geology*", Economic Geology 73 (1979) 1852-1868.

[41] White N.C., Hedenquist J.W., "*Epithermal environments and styles of mineralization: variations and their causes, and guidelines for exploration*", Journal of Geochemical Exploration 36 (1990) 445-474.

[19] Steele-MacInnis M., Lecumberri-Sanchez P., Bodnar R.J., "*HOKIEFLINCS-H2O-NACL: A Microsoft Excel spreadsheet for interpreting microthermometric data from fluid inclusions based on the PVTX properties of H2O–NaCl*", Computer in Geosciences 49 (2012) 334–337.

[20] Shafaii Moghadam H., Li X. H., Ling X. X., Santos J. F., Stern R. J., Li Q. L., Ghorbani G., "*Eocene Kashmar granitoids (NE Iran): Petrogenetic constraints from U–Pb zircon geochronology and isotope geochemistry*", Lithos 216–217 (2015) 118–135.

[21] Ramezani J., Tucker R.D., "*The Saghand region, central iran: U-Pb geochronology,petrogenesis and implications for Gondwana tectonics*", American Journal of Science 303 (2003) 622-625.

[22] Javadi H. R., Ghassemi M. R., Shahpasandzadeh M., Guest B., Ashtiani M. E., Yassaghi A., Kouhpeyma, M., "*History of faulting on the Doruneh Fault System: Implications for the kinematic changes of the Central Iranian Microplate*", Geological Magazine 150 (2013) 651–672.

[23] Kholghi Khasraghi M.H., "*Geological Map of the Torbat-e-Heydarieh*", Scale 1:100000, Geological Survrey of Iran (1996).

[24] Woodcock N.H., Omma J.E., Dickson J.A.D., "*Chaotic breccia along the Dent Fault, NW England: implosion or collapse of a fault void?*", Journal of the Geological Society 163 (2006) 431-446.

[25] Whitney D.L., Evans B.W., "*Abbreviations for names of rock-forming minerals*", American Mineralogist 95 (2010) 185-187.

[26] Chavez W.X., "*Supergene Oxidation of Copper Deposits: Zoning and Distribution of Copper Oxide Minerals*", Society of Economic Geology Newsletter 41 (2000).

[27] Roedder. E., "*Fluid inclusions*", Reviews in Mineralogy 12 (1984) 644.

[28] Sheppherd T.J., Rankin A.H., Alderton D.H.M., "*A Practical Guide to Fluid Inclusion Studies*", Blackie and Son (1985) 239.

[29] Hedenquist J.W., Henley R.W., "*The importance of CO2 on freezing point measurements of fluid inclusions: Evidence from active geothermal systems and implications for epithermal ore deposition*", Economic Geology 80 (1985) 1379-1406.

[30] Beane R.E., "*The Magmatic–Meteoric Transition. Geothermal Resources Council*", Special Report 13 (1983) 245-253.